

А.В. Гласко, А.М. Калмыков, И.В. Мещерин,
А.А. Федотов, П.В. Храпов

ЗАМОРАЖИВАНИЕ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ С ПОМОЩЬЮ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОРОВ

Представлена и исследована математическая модель замораживания грунтов оснований геотехнических объектов в криолитозоне с помощью вертикальных термостабилизаторов. Показана эффективность такого способа замораживания.

E-mail: petronyi@mail.ru, le-tail@list.ru, pkhrapov@mail.ru

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, тепловой поток, фазовый переход, криолитозона, термостабилизатор.

Одним из основных факторов, определяющих прочность и устойчивость зданий и сооружений в криолитозоне, является динамика температурного поля грунтов под их основаниями. Тепловое воздействие отапливаемого здания на вечномерзлый грунт ведет к таянию и осадке грунта. Если осадка произошла в летний период, то при последующем замерзании возникнет пучение грунта. Осадку, пучение, а в еще большей степени периодические пучение и осадка представляют собой опасные криогенные процессы, приводящие здание к аварийной ситуации. Другие примеры опасных криогенных процессов: образование морозобойных трещин, возникающих при резком понижении температуры грунта; образование наледей, обусловленное различной глубиной промерзания грунта под зданием и на открытой поверхности, солифлюкция — сползание склона в результате периодического процесса промерзания и оттаивания грунта (подразумевается, что здание или сооружение построено на склоне). Все эти опасные процессы определяются динамикой температуры грунтов под их основаниями. Поэтому одним из способов поддержания эксплуатационных свойств зданий и сооружений в районах распространения многолетнемерзлых пород является замораживание находящихся под ними грунтов.

Постановка задачи. Динамика температуры грунтов под основаниями описывается уравнением теплопроводности [1]

$$[c\rho + Q\delta(u - u^*)] \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial u}{\partial z} \right) + s(x, y, z, t), \quad (1)$$

где c , ρ , λ — удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность грунта соответственно; Q — теплота фазового перехода;

$\delta(u - u^*)$ — дельта-функция; u, u^* — температура грунта и фазового перехода соответственно (приблизительно принимают $u^* = 0$ °C), t — время; $s(x, y, z, t)$ — мощность внутренних источников теплоты.

Требуется найти решение $u(x, y, z, t)$ в ограниченной области — прямоугольном параллелепипеде $D = \{0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z\}$, удовлетворяющее начальному условию

$$u(x, y, z, 0) = \varphi(x, y, z), \quad (2)$$

где $\varphi(x, y, z)$ — заданное распределение температуры в расчетной области в момент времени $t = 0$.

На границе $z = 0$ с температурой $u = u_{п.г}$, где $u_{п.г}$ — температура поверхности грунта, происходит конвективный теплообмен со средой, имеющей температуру $\theta(t)$. Плотность теплового потока $J_{п.г}$ на этой границе выражается через коэффициент теплопередачи h так:

$$J_{п.г} = h[\theta(t) - u_{п.г}]. \quad (3)$$

На границе $z = L_z$ задан тепловой поток из недр Земли [2]:

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial z} = q_3 = \text{const}. \quad (4)$$

Боковые границы области D теплоизолированы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x}(0, y, z, t) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x}(L_x, y, z, t) = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial y}(x, 0, z, t) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial y}(x, L_y, z, t) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Объемная теплоемкость $c\rho$ в левой части уравнения (1) определяется по формуле [3, 4]

$$c\rho = \begin{cases} \rho_{с.г} \left[c_{с.г} + c_{л}(W_{общ} - W_{в}) + c_{в}W_{в} + \kappa \frac{\partial W_{в}}{\partial u} \right], & u < u^*; \\ \rho_{с.г}(c_{с.г} + c_{в}W_{общ}), & u > u^*, \end{cases} \quad (6)$$

где $\rho_{с.г}, c_{с.г}$ — плотность и удельная теплоемкость сухого грунта соответственно; $c_{л}, c_{в}$ — удельные теплоемкости льда и воды соответственно, $c_{л} = 2,05$ кДж/(кг·К), $c_{в} = 4,22$ кДж/(кг·К); $W_{общ}$ — массовая доля воды и льда (по отношению к массе сухого грунта); $W_{в}$ — массовая доля (по отношению к массе сухого грунта) незамерзшей воды при температуре u ; $\kappa = 333$ кДж/кг — удельная теплота фазо-

вого перехода льда. Отметим, что формула (6) учитывает фазовые переходы в области отрицательных температур.

Плотность влажного грунта ρ определим соотношениями

$$\rho = \begin{cases} \rho_{с.г} + \rho_{с.г} W_{общ}, & u < \tilde{u}; \\ \rho_{с.г} + \rho_{с.г} (W_{общ} - W_B) + \rho_{с.г} W_B, & \tilde{u} < u < u^*; \\ \rho_{с.г} + \rho_{с.г} W_{общ}, & u > u^*, \end{cases}$$

где \tilde{u} — температура замерзания грунтовой воды (т. е. при $u < \tilde{u}$ вся влага находится в твердом состоянии (лед), при $u > u^*$ — в жидком состоянии (вода), а при $\tilde{u} < u < u^*$ часть влаги ($\rho_{с.г} W_B$) находится в жидком состоянии, а часть $\rho_{с.г} (W_{общ} - W_B)$ — в твердом).

Зависимость $W_B(u)$ представим в виде интерполяционной формулы [3]

$$W_B(u) = \frac{\alpha_B}{\beta_B - u} + \gamma_B,$$

где $\alpha_B, \beta_B, \gamma_B$ — постоянные коэффициенты, зависящие от типа (физических характеристик) грунта (в общем случае расчетная область содержит несколько областей с грунтами различного типа — литологических слоев) и рассчитываемые по трем значениям функции W_B при трех значениях температуры u .

Теплопроводность λ в уравнении (1) определяют так:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_{м.г}, & u < u^*; \\ \lambda_{т.г}, & u > u^*, \end{cases}$$

где $\lambda_{м.г}, \lambda_{т.г}$ — теплопроводность мерзлого и талого грунта соответственно.

Коэффициент теплопередачи

$$h = \frac{1}{\alpha^{-1} + R},$$

где α — коэффициент конвективного теплообмена; R — термическое сопротивление грунта.

Теплоту фазового перехода Q при $u = u^*$ вычисляют по формуле [4]

$$Q = \kappa \rho_{с.г} [W_{общ} - W_B(u^*)].$$

Результаты расчетов. Краевую задачу (1)—(5) решаем численно методом контрольного объема [5—8]. При этом используем ступенчатую аппроксимацию δ -функции [1]:

$$\delta(u - u^*, \Delta) = \begin{cases} 1/2\Delta, & |u - u^*| \leq \Delta; \\ 0, & |u - u^*| \geq \Delta. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь Δ — параметр, зависящий от используемой расчетной сетки и определяемый, как правило, опытным путем.

Рассмотрим два примера моделирования. Необходимые для расчета значения параметров литологических слоев соответствуют данным, приведенным в работе [3]; на нижней границе области $z = L_z$ $q_3 = 50$ мВт/м² [2].

Рассмотрим сначала случай, когда здание установлено непосредственно на поверхности мерзлого грунта, а область исследования D имеет вид, представленный на рис. 1.

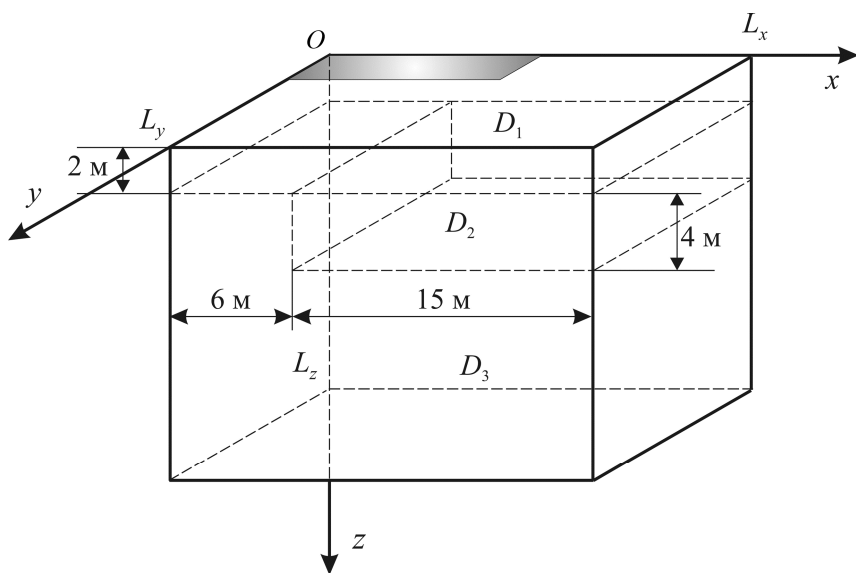


Рис. 1. Расчетная область

Плоскость Oxy при этом соответствует поверхности земли, а ось Oz направлена в глубь грунта. Закрашенный прямоугольник размером 4×10 м соответствует сечению здания, расположенного над этой областью непосредственно на поверхности земли (без фундамента), а точнее, его четверти (предполагается симметрия распределения температуры относительно плоскостей Oxz и Oyz). Координаты вершин прямоугольника, м: $(0, 0)$, $(10, 0)$, $(10, 4)$ и $(0, 4)$. Здание отапливается, и внутри него сохраняется постоянная температура $\theta = 20$ °С. Размеры области D : $L_x = 21$ м, $L_y = 15$ м, $L_z = 17$ м. Область D состоит

из трех литологических слоев D_1 , D_2 и D_3 с разными значениями физических параметров (см. рис. 1). Принадлежность точки $M(x, y, z)$ соответствующей области определяется формулами

$$D_1 = \{\forall M(x, y, z) \in D : z < 2\};$$

$$D_2 = \{\forall M(x, y, z) \in D : 6 < x < 21, 2 < z < 6\};$$

$$D_3 = D \setminus (D_1 \cup D_2).$$

Верхняя граница области $z = 0$ (рис. 2) разбита на три зоны: естественных условий теплообмена, здания и снежных надувов. В зоне, где располагается производственное здание, физические параметры остаются постоянными с течением времени. Условия в двух других зонах изменяются по месяцам года. За начало отсчета принято 1 января текущего года. Через год (1 год = 8 760 ч) эти условия повторяются, т. е. условия на верхней границе являются периодическими функциями времени с периодом $T = 8760$ ч.

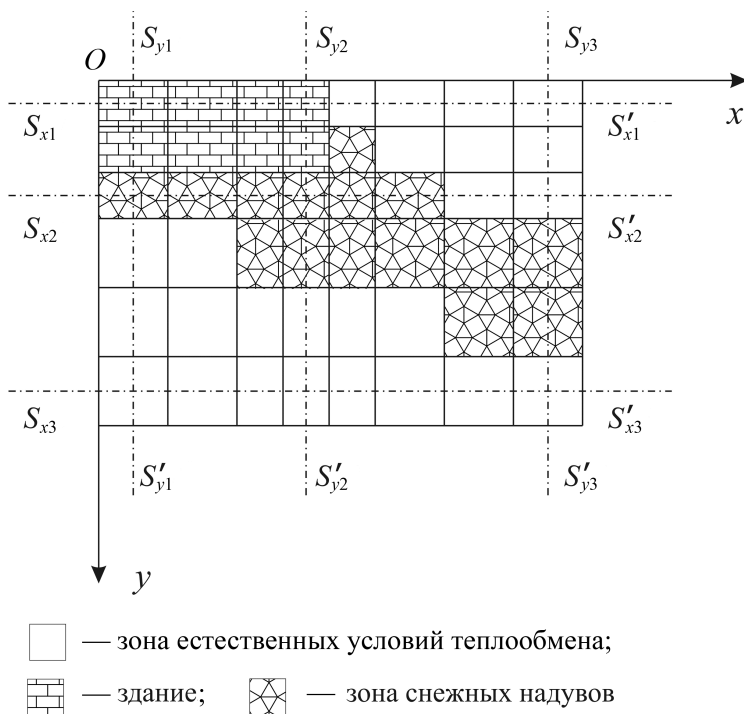


Рис. 2. Верхняя граница расчетной области

Начальное распределение температуры грунта зависит только от глубины [2], т. е.

$$u(x, y, z, 0) = \varphi(z).$$

Проанализируем результаты численного решения задачи (1)—(5). На рис. 3 видно, что мерзлый грунт под зданием в сечении $S_{x1} - S'_{x1}$ ($y = 1$) через 5 лет после начала эксплуатации последнего станет талым и здание окажется в аварийной ситуации.

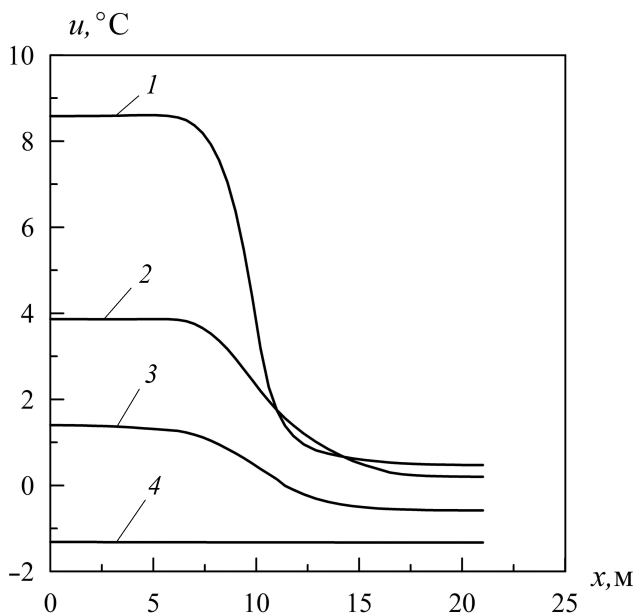


Рис. 3. Распределение температуры грунта под зданием на глубине $z = 1$ (1), 3 (2), 5 (3) и 15,5 м (4) при $y = 1$ м через 5 лет после начала эксплуатации здания, расположенного непосредственно на поверхности грунта

Избежать аварийной ситуации можно, если искусственно сохранять вечномерзлые грунты основания в мерзлом состоянии и в процессе строительства, и в течение всего периода эксплуатации здания (использование вечномерзлых грунтов по принципу I [9]). Для этого грунт основания здания, установленного непосредственно на поверхности мерзлого грунта, предлагается заморозить с помощью вертикальных термостабилизаторов.

Рассмотрим те же здание и расчетную область, что и выше, но для случая, когда под зданием установлены вертикальные гладкостенные термостабилизаторы СГВ-100-40/9. Глубина погружения термостабилизаторов в грунт $z_0 = 8$ м, мощность $s_0 = -32,94$ Вт/м. Динамика функционирования термостабилизаторов следующая [10]. Каждый год они работают с постоянной мощностью s_0 с 1 октября по 31 марта и не работают с 1 апреля по 30 сентября. Всего в расчетной области размещено 9 термостабилизаторов с координатами $x = 1,5; 5,5; 9,5$ м и $y = 1,5; 2,5; 4,5$ м (точки на рис. 4).

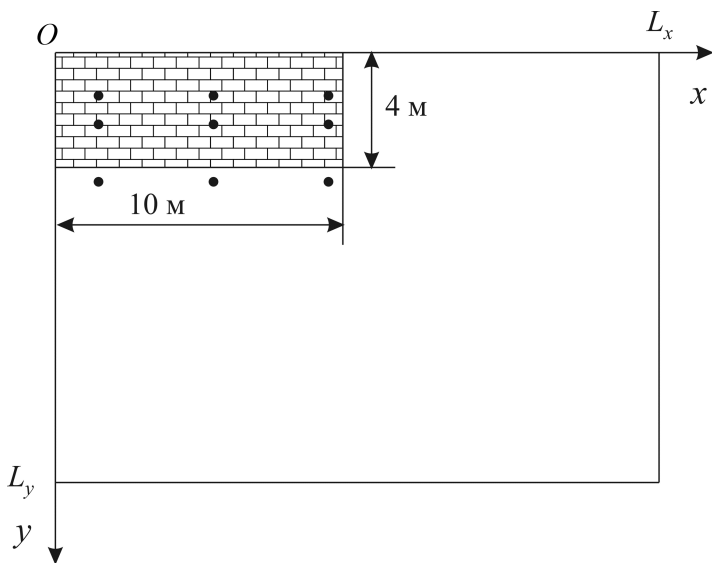


Рис. 4. Схема размещения термостабилизаторов

Термостабилизатор рассматриваем как бесконечно тонкий стержень (площадь поперечного сечения пренебрежимо мала по сравнению с площадью сечения контрольного объема плоскостью $z = \text{const}$), являющийся источником теплоты (с отрицательной мощностью) внутри расчетной области:

$$s(x, y, z, t) = s_0(t)\delta(x - x_0)\delta(y - y_0)I_{[0, z_0]}(z),$$

где x_0, y_0 – координаты размещения термостабилизатора в плане; $s_0(t) = s_0$ в период с 1 октября по 31 марта и нулю в остальное время года; $I_{[0, z_0]}(z)$ – индикатор отрезка $[0, z_0]$, $I_{[0, z_0]}(z) = 1$ при $zw_k \leq z_0$ и 0 — в противном случае; zw_k – координата верхней грани рассматриваемого контрольного объема вдоль оси z .

В методе контрольного объема используют среднее значение функции $s(x, y, z, t)$ по контрольному объему. При его вычислении в результате интегрирования сингулярность, связанная с δ -функцией, исчезает и для функции $s(x, y, z, t)$ не требуется специальной процедуры сглаживания, как для функции $\delta(u - u^*)$ в уравнении (1) (см. формулу (7)).

На рис. 5 представлены расчетные зависимости $u(x)$, свидетельствующие о том, что грунт под зданием мерзлый. Кроме того, согласно данным, приведенным на рис. 6, в течение 5 лет после начала эксплуатации здания при использовании термостабилизаторов во всех рассматриваемых точках температура грунта остается отрицательной. Заметим, что точка наблюдения с координатами (1,5; 1,0; 1,0) находится в непосредственной близости от термостабилизатора с координатами (1,5; 1,5).

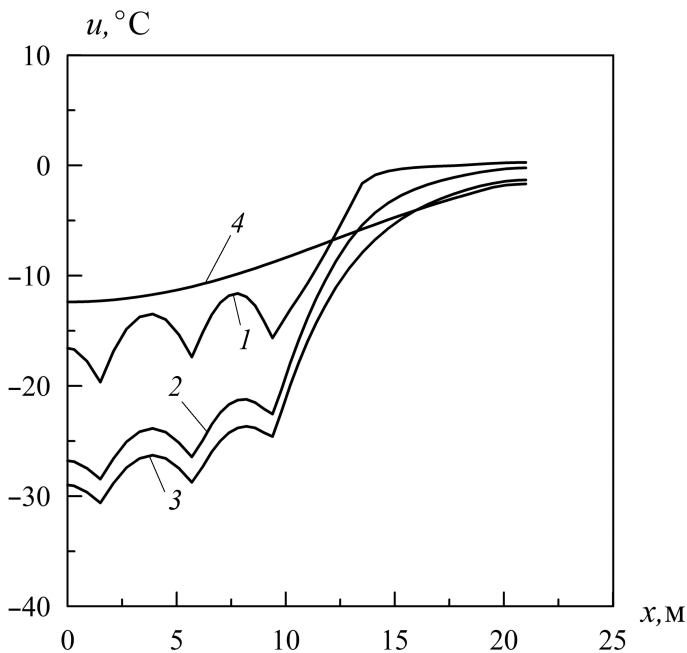


Рис. 5. Распределение температуры грунта под зданием на глубине $z = 1$ (1), 3 (2), 5 (3) и 15,5 м (4) при $y = 1$ м через 5 лет после начала эксплуатации здания с использованием термостабилизаторов

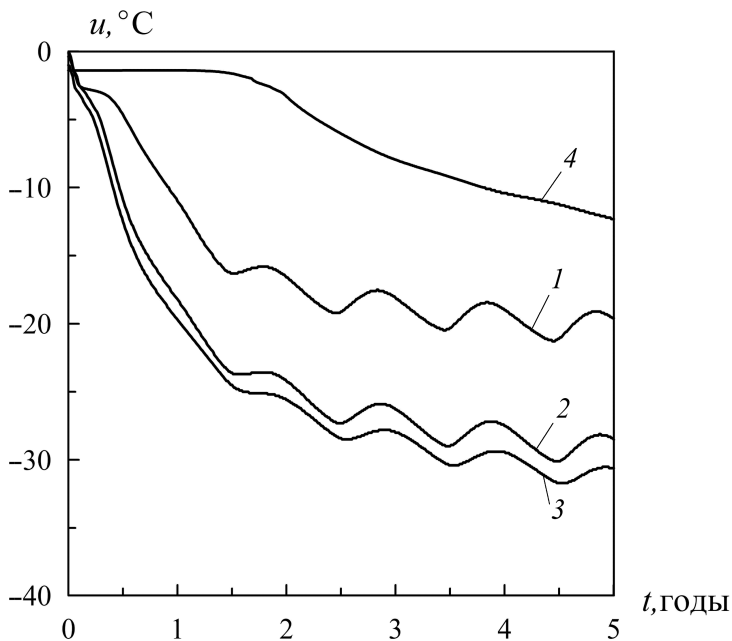


Рис. 6. Распределение температуры грунта под зданием на глубине $z = 1$ (1), 3 (2), 5 (3) и 15,5 м (4) при $x = 1,5$ м и $y = 1$ м в течение 5 лет после начала эксплуатации здания с использованием термостабилизаторов

Из сравнения зависимостей, приведенных на рис. 5 и 6, замораживание может показаться излишним. Однако распределение температуры в летний период первого года эксплуатации при прочих равных параметрах (рис. 7) свидетельствует о том, что температура под зданием в основном ниже нуля, однако есть небольшой участок (между соседними термостабилизаторами) с незначительной положительной температурой.

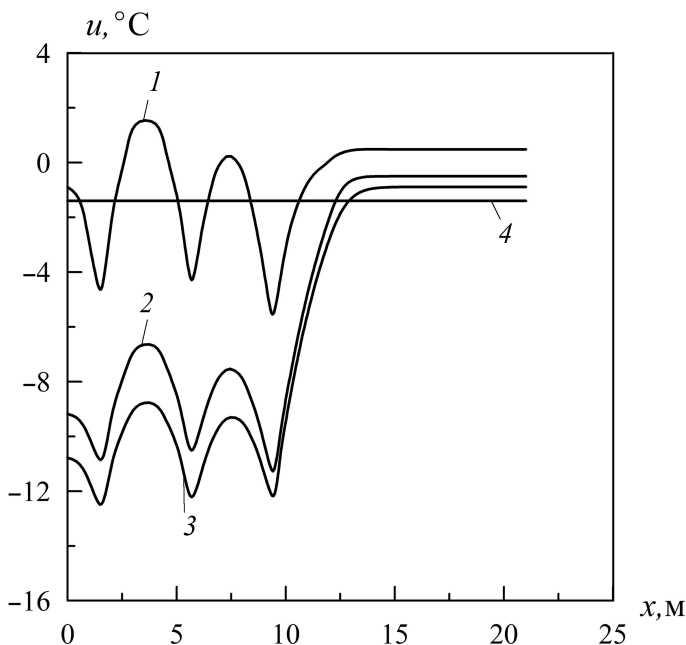


Рис. 7. Распределение температуры грунта под зданием на глубине $z = 1$ (1), 3 (2), 5 (3) и 15,5 м (4) при $y = 1$ м на 1 июля первого года эксплуатации здания с использованием термостабилизаторов

Работа выполнена при финансовой поддержке ОАО «Газпром».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 784 с.
2. Короновский Н.В. Общая геология: учебник. – М.: Изд-во «Книжный дом «Университет», 2006. – 528 с.
3. РСН 67–87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами. – М.: Госстрой РСФСР, 1987. – 40 с.
4. СНиП 2.02.04–88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – М.: Стройиздат, 1990. – 53 с.
5. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

6. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 312 с.
7. Веденеева Е.А. Применение метода контрольного объема к решению задач динамики вязких теплопроводных жидкостей. – М.: Изд-во МГУ, 2009. – 87 с.
8. Моделирование динамики температурного поля грунтов основания здания в криолитозоне / А.В. Гласко, А.А. Федотов, Н.И. Сидняев, П.В. Храпов, Ю.С. Мельникова // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». 77-30569/274059. № 12. 2011.
<http://technomag.edu.ru>
9. Хрусталев Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 544 с.
10. К вопросу о типовых технических решениях по основаниям и фундаментам для криолитозоны / А.П. Попов, В.И. Милованов, В.В. Жмулин, В.А. Рябов, М.А. Бережной // Инженерная геология. – 2008. – № 3. – С. 22–39.

Статья поступила в редакцию 28.09.2012